

物 理 教 育 方 法 論

服 部 孝

序

自然科学は自然界の物質構造や法則ならびに現象を研究する学問として古くから西欧を中心に発達した。現在の自然科学は物理学，化学，生物学などに分類され，主に大学の理学部において教授ならびに研究されている。一方，応用科学は自然科学から得られた成果を利用して科学技術を開発し，人間や人間社会への応用を研究する学問として近年急速に発展した。現在の応用科学は工学，医学，歯学，薬学，農学などに分類され，主に大学のそれぞれ専門の学部（工学部，医学部，歯学部，薬学部，農学部など）で教授ならびに研究されている。自然科学は科学技術を支えている応用科学の基礎としての側面をもっている。したがって自然科学の諸講座は大学の理学部に限らず，大学の教養部またはそれぞれ応用科学の学部教養課程においても開設されている。

今後も科学技術は急速に進歩発展することが予想され，将来の高度文明社会において科学技術が人間社会に与える影響は現在よりも増大すると思われる。このような状況において，科学技術や応用科学ならびに自然科学を教授研究している大学等の高等教育機関の果たす役割は特に重要である。何故ならば前述の大学は科学技術や応用科学ならびに自然科学を次の世代に継承するという社会的機能をもっており，このことは将来の高度文明社会に大きな影響を与えると考えられるからである。

自然科学の中，物理学は他の自然科学部門なら

びに応用科学や科学技術の基礎と関連性をもっている。例えば最近急速に発達した科学技術である半導体利用技術や核エネルギー利用技術はそれぞれ電子工学や核工学を基盤として成り立っているが，これら電子工学や核工学は応用科学の一部門であり，その基礎的側面は物理学をはじめとする自然科学に帰着される。

以上の諸点から本稿では物理学の方法ならびに歴史などについて概括した後，大学における物理教育の方法等について考察する。また物理教育方法論の必要性や，その意義についても科学技術や応用科学との関連において考察する。

§ 1 物理学 physics の方法

物理学は現象 **phenomenon** の定量的把握と法則 **law** の数学的定式化 **mathematical formulation** にその特徴をもっている。すなわち物理学の研究対象は自然界において大きさの考えられる要素間の量的関係が主であり，特定の個物に限定されない。

物理学の起源は遠く古代ギリシャの自然哲学 **natural philosophy** までさかのぼるが，実験 **experiment** ならびに理論 **theory** の体系化 **systematization** が進んだのは比較的新しく西欧ルネッサンス以後と言われている。古代ギリシャの自然哲学すなわち **Thalēs** (B. C. 600 年頃)，**Pýthagoras** (B. C. 500 年頃)，**Dēmocritos** (B. C. 400 年頃) 達の諸学説は，自然界の多種多様な諸現象を少数の基本的原理により系統的に説明しようとした点で近代物理学と類似してい

る。しかし、古代ギリシャの自然哲学は演繹的方法 **deductive method** による論理的帰結を重視するが、帰納的方法 **inductive method** を用いた実験観測等による実証を軽視している点で近代の物理学と異なる。近代の物理学は演繹的方法による論理的帰結すなわち理論的研究と帰納的方法を用いた実験観測等による実証すなわち実験的研究の双方が重視され、両者は互いに密接に関連している。近代の物理学の原型 **proto type** は I. Newton の著書 *Philosophiae naturalis Principia mathematica* 1687（自然哲学の数学的原理）にみることができる。

現在の物理学は歴史的側面から古典物理学 **classical physics** と現代物理学 **modern physics** に分類され、また研究方法の面から理論物理学 **theoretical physics** と実験物理学 **experimental physics** に分類される。古典物理学は力学 **mechanics**, 光学 **optics**, 熱学 **theory of heat**, 電磁気学 **electromagnetics**, 相対性理論 **theory of relativity** などに分類され、現代物理学は原子物理学 **atomic physics**, 物性物理学 **condensed matter physics**, 核物理学 **nuclear physics**, 素粒子物理学 **elementary particle physics** などに分類される。古典物理学は20世紀初頭までにはほぼ完成された物理学であって、主に巨視的立場 **macroscopic viewpoint** で体系が構成されている。これに対し、現代物理学は20世紀初頭以後発達した物理学であって、主に量子論 **quantum theory** を基礎とする微視的立場 **microscopic viewpoint** で体系が構成されている。

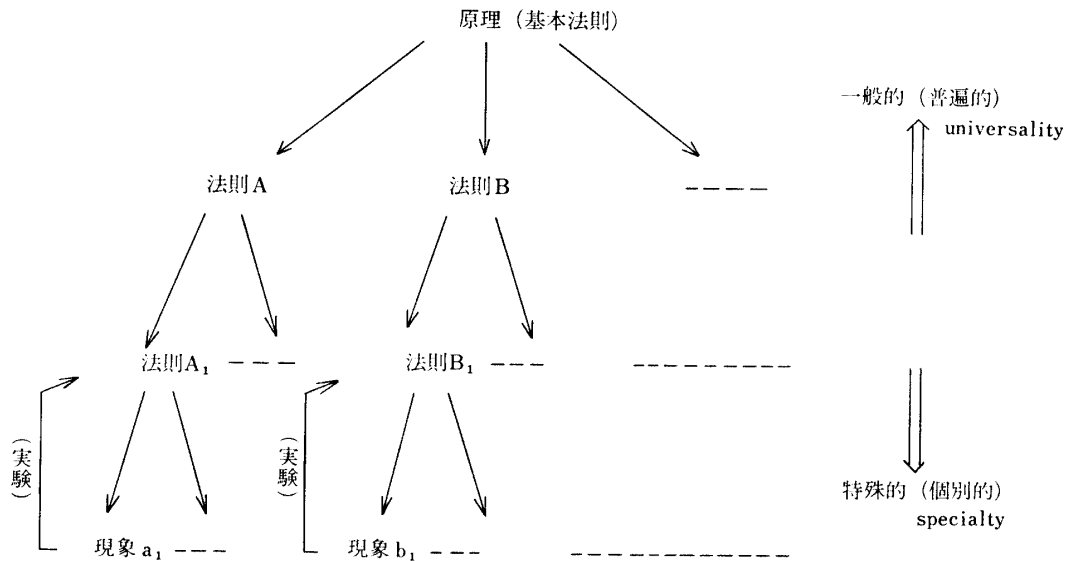
巨視的立場では実験観測等により測定可能な各種の量の中、基本的な量の間で成立する普遍的な法則に基づいて自然界の多種多様な諸現象を系統的に説明する。これに対し、微視的立場では物質の構成要素である粒子 **particle**（例えば原子 **atom**, 素粒子 **elementary particle** など）を支配する基本法則に基づいて各種の粒子の挙動から

自然界の多種多様な諸現象を系統的に説明する。巨視的立場において実験観測により測定される量を巨視量と言い、微視的立場において粒子の属性やその状態を表わす量を微視量と言う。微視量は感覚的経験を通して直接認識することはできないが、微視量の統計的平均または総和は巨視量を与える。物理学において巨視的立場と微視的立場は双方とも極めて重要な自然認識の方法である。理論物理学は理論体系の構成ならびに法則の数学的定式化、諸現象の理論的説明や予言などに関する研究が主体となる。一方、実験物理学は実験観測を通して諸現象の定量的把握や法則の認識、ならびに実験装置や実験方法などに関する研究が主体となる。このように理論的研究と実験的研究の分化が顕著にみられるようになるのは19世紀に入ってからのこととされている。

物理学において理論 **theory** とは一般的な法則の間の関連を記述する論理体系のことを言い、実験 **experiment** とは人為的に整えられた条件のもとで起こる現象を観測測定することを言う。ここで法則とは諸々の現象間に一般的に成り立つ関係のことで、数学的には方程式 **equation** として表現される。特に理論体系の基礎となる法則のことを原理 **principle** または基本法則という。また現象とは物理量の間で数量的関係のことで、数学的には関数 **function** として表現される。物理学における量 **quantity** すなわち物理量は測定法などを一般的な法則に基づいて厳密に定義したものである。古典物理学における物理量は単位 **unit** を基準とした数値 **number**（主に実数）または数値の組で表現されるが、量子論を基礎とした現代物理学における物理量は演算子 **operator** または行列 **matrix** などで表現される。

物理学の体系 **system** を図式化すると第1図のようになる。

第1図で上方に位置している法則 A, B, …は広い範囲にわたって成立する一般的な法則を示



第 1 図

し、下方に位置している法則 A_1, B_1, \dots は限られた範囲の現象間で成立する特殊な法則を示す。また、上から下へ向いた矢印は演繹の方法を示し、これらは主として数学的操作によって行われる。(例えばある初期条件や境界条件のもとで微分方程式を解くことなど。) これに対して下から上へ向いた矢印は帰納的方法を示し、これらは主として実験に基づくデータ処理操作によって行われる。このように物理学の体系は原理、法則、現象などの一般性(普遍性 *universality*)の程度に応じて階層構造を形成している。これはグラフ理論 *graph theory* の立場からみると一つの樹木構造 *tree structure* をなしていると考えられる。

§ 2 古典物理学の歴史

古典物理学の歴史について分野別に概括する。

(1) 力学 *mechanics*

力学は物理学の中で比較的早く体系化が進んだ分野である。力学は西欧ルネサンス頃から盛んになった天体の運動に関する先駆的研究に端を発している。N. Copernicus は著書 *De revolutionibus orbium coelestium libri VI*. 1543 (天体の回転についての六巻) において、太陽中心体系

に基づく天体の円運動を論じた。当時、K. Ptolemaios の宇宙体系すなわち地球中心体系に基づいて天体の運動が論じられていたが、天体観測の測定結果を説明するためには複雑な仮定を必要とし、諸々の困難があった。J. Kepler は Tycho Brahe の天体観測の測定結果に基づいて火星の運動を研究し、1609年から1619年頃にかけて楕円軌道の法則ならびに面積速度一定の法則を見出した。また、楕円軌道の長軸と公転周期との定量的関係〔Kepler の法則〕についても把握した。G. Galilei は Copernicus の太陽中心説を支持し、さらに物体の速度の変換則〔Galilei 変換〕や運動の相対性について論及した。G. Galilei の著書 *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica ed i movimenti locali* 1638 (力学と運動という2つの新しい科学に関する講話とその数学的証明) は後世に大きな影響を与えた。

I. Newton は物体の運動に関する数学的研究を行い、力学の基本法則〔慣性の法則、Newton の運動方程式、作用反作用の法則〕を確立した。そして万有引力の法則〔重力の法則〕に基づいて天体の運動や地上における重力などを統一的に説明した。I. Newton の著書 *Philosophiae na-*

turalis Principia mathematica 1687 (自然哲学の数学的原理) によって力学体系の基礎的枠組は形成されたものとみなされる。D. Bernoulli は流体の運動に関する研究から、1738年に流体力学における主要な関係式〔Bernoulli の定理〕を導出した。J. d' Alembert は力学法則を複雑な力学系へ適用する一般的方法を研究し、1743年に力学の基本原理解〔d' Alembert の原理〕を提出した。Maupertuis は力学法則と光学法則の類似性について研究し、1746年に物体の運動経路はその作用量を極小にするような経路をとるという基本原理〔最小作用の原理〕を提出した。L. Euler は流体や剛体の運動についての理論的研究から、1755～1760年に流体力学ならびに剛体力学における基本方程式〔Euler の運動方程式〕を導出した。

J. L. Lagrange は力学体系を解析学に準ずる演繹的論理体系として再構成しようとした。そこで J. L. Lagrange は一般化座標を用いた配位空間を導入して d' Alembert の原理や最小作用の原理を数学的に定式化し、解析力学における基本方程式〔Lagrange の運動方程式〕を導出した。J. L. Lagrange の著書 *Mécanique analytique* 1788 (解析力学) によって解析力学 (Lagrange 形式) の基礎が確立されたものとみなされる。W. R. Hamilton は1834～1835年に解析力学 (Hamilton 形式) における基本方程式〔正準方程式〕を導出し、最小作用原理ならびに変分原理を基礎とする解析力学を構成した。ここにおいて古典力学の体系はほぼ完成したものとみなされる。この変分原理を基礎とする力学理論は後にあらゆる物理理論の規範とされ、理論構成ならびに定式化に際して極めて重要な役割をもつことになる。

(2) 光学 optics

光についての研究は古く、すでに古代ギリシャ時代に Eukleides は光の直進や反射について述

べている。W. Snel は1621年頃に光の屈折に関する法則〔Snel の法則〕を見い出した。P. Fermat は1661年に光線はその光学距離を最小にするような経路をとるという基本原理〔Fermat の原理〕を提出した。これによって光の直進、反射、屈折などの諸現象が統一的に説明され、幾何光学の基礎が確立された。I. Newton は光の色に関する研究により、1672～1673年頃に光の粒子説を展開した。O. C. Römer は1675年に木星の衛星の食に関する研究により光の速度を求めた。

C. Huygens は1678～1690年に光の波動説に基づき光波の伝播を無数の微小球面波〔素元波〕の重ね合わせとして記述し、光の直進、反射、屈折などの諸現象を説明した。

光線の進路に関する研究を主とする幾何光学の体系化は比較的早く進んだが、光の本性に関する研究では粒子説と波動説が対立し、この問題は後の現代物理学の基礎理論〔量子論〕に致るまで長く引き続くこととなった。

T. Young は1801年に光の干渉の研究から光の波動説を支持した。A. J. Fresnel は1815～1821年に光の波動説を数学的に定式化して光の回折や複屈折などの光学現象を弾性波動論の立場から理論的に説明し、物理光学の基礎を確立した。この当時の光の波動説では、光はエーテル ether という仮想的媒質中を伝播する弾性波であると考えて力学的に説明しようとしていた。J. V. Lorenz は1869年に光の弾性波動論に基づき物質の密度と屈折率との関係〔Lorentz-Lorenz の公式〕を導出した。

光の反射、屈折などの現象は粒子説、波動説、いずれによっても説明できるが、光の干渉や回折などの現象に関しては波動説の方が有力であると考えられた。しかし、光の波動説の弱点は媒質エーテルの存在というアドホック ad hoc 仮説を導入しなければならない点にある。後述するように19世紀後半には電磁気学の体系化が進み、J. K.

Maxwell によって電磁波の存在が理論的に示され、光は電磁波の一種であることが明らかとなるに及んで光学現象は電磁気現象の一形態として包括されることになった。さらに光の本性に関する問題は、20世紀初頭から発展した量子論により光は粒子と波動の二重性をもつとする新しい自然観によって置き換えられることになった。

(3) 熱学 theory of heat

熱学は主に産業革命の時期を中心に発展した物理学の分野である。R. Boyle は1662年に定温における気体の圧力と体積の関係〔Boyle の法則〕を見い出した。A. Celsius は1741年に温度定点として一気圧における水の沸点と氷点を基準とする目盛〔Celsius 温度 $^{\circ}\text{C}$ 〕を考案した。J. Black は1762～1764年に熱容量や潜熱に関する研究により熱と温度の概念的区別を明確にした。G. Rumford は摩擦熱の研究により、1798年に熱の本質は運動にあるという見解を述べ、当時主流であったカロリック説〔熱素説〕を否定した。J. L. Gay-Lussac は気体の熱膨張について研究し、1802年に気体の温度と体積の関係〔Gay-Lussac の法則〕を見い出した。J. B. J. Fourier は熱伝導について数理的に研究し熱伝導の方程式を導出した。また、この熱伝導の方程式を解くに際して、任意関数は三角級数〔Fourier 級数〕で表わせることを示し、1810年に熱拡散の問題を解決した。L. L. S. Carnot は蒸気機関について研究し、1821年頃に熱機関の理論的モデルであるサイクル cycle〔Carnot サイクル〕やその効率〔Carnot の定理〕について論及した。

J. R. Mayer は1842年に初めてエネルギー energy の保存について論じた。H. L. F. Helmholtz は1847年に力学的、熱的、電氣的、化学的なエネルギーの相互変換に際し、エネルギーの総量は一定不変であるとする基本原理〔エネルギー保存則〕を確立した。J. P. Joule は熱量と力学的仕事との関係について研究し、1847年に仕事と熱

量の比〔熱の仕事当量〕を求めた。

R. J. E. Clausius は1850年に熱量と力学的仕事との等価性〔熱力学第一法則〕を示し、さらに熱量と仕事との相互変換に関する条件〔Clausius の原理、熱力学第二法則〕についても定式化した。また、1865年には系の状態量としてエントロピー entropy の概念を導入し、熱現象の不可逆性からエントロピーの増大を論証した。これら R. J. E. Clausius によってなされた研究により熱力学の基礎的枠組は確立されたものとみなされる。

一方19世紀後半には統計力学が発達した。莫大な数からなる粒子系に対しては個々の粒子の運動について厳密な因果律に従った力学的記述を与えることは実際上不可能である。また、このように多数の粒子からなる系全体の物理的性質を知るためには、必ずしも個々の粒子の正確な運動を求める必要はなく、むしろ多粒子系の示す統計的法則性が重要になる。したがって多数の粒子からなる系に対しては確率論的方法を用いた力学体系すなわち統計力学が有効である。

J. C. Maxwell は気体分子速度の統計分布〔Maxwell の速度分布則〕に関する研究により、1859年に気体分子運動論の立場から気体の粘性や拡散を論じた。

L. E. Boltzmann は1872年に統計力学の基本方程式〔Boltzmann 方程式〕を導出し、さらにH定理によって分子運動論の立場からエントロピー増大則の理論的証明を与えた。L. E. Boltzmann の著書 *Vorlesungen über Gastheorie* 1896～1898によって統計力学の基礎は確立されたものとみなされる。また、L. E. Boltzmann は科学思想の面で原子論 atomistic を主張し、エネルギー論 energetics を主張する W. Ostwald らと対立した。

J. W. Gibbs は著書 *Elementary Principles in Statistical Mechanics Developed with*

Special Reference to the Rational Foundation of Thermodynamics 1902において熱力学と統計力学を包括する熱学体系を構成した。ここに熱現象ならびに熱力学の諸法則は確率論的方法により力学に帰着されることとなり熱学体系がほぼ完成する。

ここで原子論とエネルギー論について概説する。原子論の歴史は古く、古代ギリシャの *Dē-mocritos* に始まる自然観であって、これは物質の究極的構成要素としてそれ以上分割不可能な粒子 *atom* (原子) を考え、諸々の自然現象を多数の *atom* の挙動によって説明しようとする立場である。この原子論は現在の観点でとらえると明らかに微視的立場に立脚している。現在の観点から再構成された古典物理学体系は §1 で示べたように巨視的立場に立脚しているが、19世紀に至るまでの古典物理学の発展過程においては微視的立場である原子論が理論構成の際のモデルとして背後に存在しており、原子論の果たした役割は看過し得ない。特に古典物理学発展後期における気体分子運動論や古典電子論などは微視的立場の原型であり、後の現代物理学に与えた影響は極めて大きいと言わざるを得ない。一方エネルギー論は19世紀後半において *E. H. Haeckel*, *F. Ostwald*, *E. Mach* らによって展開された自然観であって、これは観測可能な量に基づく法則の中で普遍性の高い法則 (例えばエネルギー保存則) を基本法則として体系を構成し、諸々の現象をこの基本法則から系統的に説明しようとする立場である。エネルギー論は観測可能量を重視するために *atom* のように当時観測不可能であった対象は排除されることになる。このエネルギー論は現在の観点でとらえると明らかに巨視的立場に立脚している。

(4) 電磁気学 *electromagnetics*

物理現象の中でも電磁気現象は最も古くから知られていた。すでに古代ギリシャの *Thalēs* は *B. C.* 600年頃コハクを摩擦することによって起

こる静電気について観察している。また、磁石が南北を向くこともかなり古くから知られていた。しかし、電磁気学の体系化が進んだのは比較的新しく19世紀も後半になってからのことである。このように電磁気学の体系化がおくれた理由として、電磁気現象は力学、光学、熱学等の諸現象に比較して感覚的経験により直接認識することが困難であるために電磁気現象の定量的把握が遅れたことなどが一因と考えられる。

W. Gilbert は1600年頃電気と磁気とを区別し、さらに地球を一つの磁石と考えて地磁気の現象を説明した。*C. A. Coulomb* は静電気を帯びた物体間に作用する力について研究し、1785年に静電気力に関する法則〔*Coulomb* の法則〕を見出し、さらに磁極の間に作用する力についても類似の法則を提出した。

電磁気学発展初期の段階においては電気学と磁気学は独立した体系として構成されているが、電気と磁気の類似性は古くから知られていた。1800年に *A. Volta* によって電池〔*Volta* の電池〕が発明されてから定常電流が得られるようになり、電磁気学は急速に発展することになる。

H. C. Ørsted は1820年に電流によって磁針が振れることから電流の磁気作用を発見した。*J. B. Biot* と *F. Savart* は電流が流れている導線と磁極との間に作用する力について研究し、1820年に電流の磁気作用に関する法則〔*Biot-Savart* の法則〕を見出した。*G. S. Ohm* は1826年に電流の強さと起電力の間の定量的関係〔*Ohm* の法則〕を見出した。

A. M. Ampère は電流間に作用する力に関する研究より、1823年に電流回路と磁石とは等価であることを示して電流と磁場との基本的関係〔*Ampère* の法則〕を定式化し、さらに磁石を微小な電流回路の集まりとして説明する分子電流説を提出した。これによって電気と磁気の関連性が明確になり、ここに電気学と磁気学は電磁気学

として統一されることになる。さらに A. M. Ampère は電流間に作用する力の伝達機構について遠隔作用説の立場をとり、1827年には力学体系を規範とした電磁気学の体系化を試み、電気力学を構成しようとした。

M. Faraday は1831年に磁場の変化によってコイルに電流が生じることから電磁誘導の法則を見出した。さらに M. Faraday は力線 の概念を導入して電磁気的な力の伝達機構を近接作用説の立場から説明しようとした。一方 W. Weber は Ampère の電気力学を一般化し、1846年には遠隔作用説の立場から電磁誘導の法則を説明しようとした。当時までは力の伝達機構に関しては遠隔作用説が主流であり、電磁気力についても遠隔作用説に基づいて説明されていた。これに対して M. Faraday が電磁気的な力を物体間の空間に分布する力線によって表現したことは近接作用説の有効性を示唆しており、後の電磁気学の発展に重要な意味をもっている。

ここで遠隔作用説と近接作用説について概説する。力の遠隔作用説においては空間的に離れている物体間の力学的作用は直接かつ瞬時に伝達するとされるので伝達時間を要せず、それら物体間の力の伝達機構を説明するための媒体などは一切考えない。Newton 力学における力の概念は基本的には遠隔作用説の立場に立脚しており、この典型は Newton の万有引力則である。この Newton 力学によって天体の運動ならびに地上の重力現象など数多くの力学現象が説明され、さらに Newton 力学の理論的帰結は極めて高い精度で実験観測結果と一致したため、その後は力の遠隔作用説が有力視されることになり電磁気学の発展にも影響を与えることになった。特に電磁気学発展初期における静電気や静磁気に関する Coulomb の法則などは逆二乗則であるという点で、その数学的形式が Newton の万有引力則と類似しており、さらに力の媒体などが導入されていない点など遠

隔作用説の色彩が濃い。これに対して力の近接作用説においては空間的に離れている物体間の力学的作用は媒質を介して順次に伝達していくとされるので伝達時間を要し、それら物体間の力の伝達機構を説明するために何らかの媒体を考える。この力の近接作用説は R. Descartes に始まると言われている。近接作用説は現在の場の理論の起源であり、後の物理学の発展に大きな影響を与えることになる。

J. C. Maxwell は M. Faraday による力の近接作用説の立場から電磁気学の理論体系を構成するために力線に関する理論的モデルを研究した。そこで J. C. Maxwell は流体力学や弾性体力学における流線や応力などと力線との概念的類似性を用いて電磁気学の基本方程式〔Maxwell の電磁場方程式〕を導出し、さらに当時知られていた電磁気学の諸法則を数学的に定式化した。そして J. C. Maxwell は電流概念の一般化である変位電流を導入し、電磁波の存在をも理論的に予言して光の電磁波説を提出した。J. C. Maxwell の著書 *A Treatise on Electricity and Magnetism* 1873 によって電磁気学の基礎的枠組は形成されたものとみなされる。当時は電磁波を伝播する媒質としてエーテルの存在を仮定している。

H. A. Lorentz は 1875～1878年に光の電磁波説に基づいて反射、屈折などの光学法則に対する理論的説明を与え、さらに物質の密度と屈折率との関係〔Lorentz-Lorenz の公式〕を導出した。この公式は L. V. Lorenz が光の弾性波動論に基づいて1869年に導出していた公式である。

その後 O. Heaviside によって電磁気学体系の数学的整備がなされ、1885年にはベクトル記法や演算子記法などが導入された。また、1888年 H. Hertz によって電磁波の存在が実験的に確認され、電磁波が横波の性質をもつことも示された。

H. A. Lorentz は、物質の構成要素として荷電粒子〔電子 electron〕の概念を導入して、物

質の電磁氣的性質をこの電子の挙動に帰着させることにより、電磁場と物質との区別を明確にし電磁場を物質と対等の基本的実在として把握しようとした。そして1892～1895年には電磁場と物質との相互作用に関して速度に依存する力〔Lorentz力〕を用い、Maxwellの電磁場方程式とNewtonの運動方程式とを基礎とした理論体系を構成し、ここに古典電子論を確立した。H. A. Lorentzの著書 *The Theory of Electrons and Its Application to the Phenomena of Light and Radiant Heat* 1909によって古典電磁気学の体系はほぼ完成されたものとみなされる。H. A. Lorentzによる電子論は古典的とは言え、微視的立場で体系が構成されている点で現代物理学の原型であり、また電磁氣的自然観に基づいて力学、光学、電磁気学などを統一的に記述しようとした点で古典物理学の頂点に立つ理論と言える。

(5) 相対性理論 theory of relativity

相対性理論は時間空間座標の変換 transformation に対する物理法則の不変性 invariance に基づく理論である。すなわちあらゆる物理理論の基本方程式は座標変換に対して同一の数学的形式を保持するように定式化される。力学の基本方程式であるNewtonの運動方程式がGalilei変換に対して不変であることは古くから知られていた。しかし、電磁気学の基本方程式であるMaxwellの電磁場方程式はGalilei変換に対しては不変とならず、この変換では同一の数学的形式を保持し得ない。

19世紀末頃においては、電磁波は媒質エーテル中を伝播するとされていたために、運動している物体中での電氣的・光學的諸現象と媒質エーテルとの関係が重要問題となっていた。この媒質エーテルは全宇宙空間にくまなく充満していると仮定され、あらゆる物体の運動を記述するための絶対的基準と考えられていた。

1887年に A. A. Michelson と E. W. Morley

は媒質エーテルと地球との相対運動を実験的に検出するために、進行方向の異なる光の干渉について精密測定を行った結果、光速度が地球の運動方向に依存しないことが示され、目的の相対運動は検出されなかった。しかし、この Michelson-Morley の実験は後に相対性理論の基礎となる光速度不変の原理に対する実験的根拠を与えるものとして歴史的に重要な意味をもつ。

H. A. Lorentz は運動している物体中での電磁氣的・光學的現象に関する理論的研究により、すべての運動物体はその運動方向に対し速度に応じて収縮するという仮説〔Lorentz 収縮〕を導入した。そして媒質エーテルに対する物体の運動を考察し、1904年には Maxwell の電磁場方程式を不変にするような座標変換則〔Lorentz 変換〕を導出した。

A. Einstein は電磁気学の基本方程式系についての対称性に関する理論的研究により、媒質エーテルの存在を仮定することは無意味であることを洞察し、光速度不変の原理に基づいて Lorentz 変換を導出した。光速度不変の原理によると真空中の光速度は光源の速度に依存しない普遍定数とされる。また、A. Einstein は時間、空間に関する概念的 analysis を行い、Newton 以来公理的に確立されていた時間、空間などの基本概念を根本的に変革した。従来の Newton 力学では空間は均一・等方であり、空間内のあらゆる点において時間は一様な歩度で経過していくとされ、この数学的定式化が Galilei 変換であると言える。したがって Newton 力学においては空間的な長さや時間的経過などが観測者や物体の運動状態によって影響を受けることはない。これに対して A. Einstein は空間的長さや時間的経過などは観測者や物体の運動状態に依存する相対的概念であることを示し、さらにあらゆる物体の運動はすべて相対的であるとして、物体の運動を記述する際の絶対的基準である媒質エーテルの存在を否定した。そして

Newton 力学における基本方程式〔Newton の運動方程式〕を Lorentz 変換に対して不変となるように修正し、相対論的力学の基礎を確立した。この相対論的力学の帰結として、質量とエネルギーの等価性や質量の速度依存性ならびに運動物体の空間的長さの収縮や時間的経過の遅れなどの相対論的効果が示された。ここで運動物体の空間的長さの収縮は、すでに H. A. Lorentz により仮説として導入されていたものである。また、速度の上限は真空中の光速速度であって、それ以上の速度をもつ物体は原理的に存在し得ないことも結論された。A. Einstein の論文 *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* 1905 によって相対性理論の基礎的枠組は確立されたものとみなされる。1908年に H. Minkowski は一次元の時間と三次元空間とから構成される四次元時空〔Minkowski 時空〕を導入することにより、物理理論の基本方程式系を四次元的に表現し、相対性理論に対する厳密な数学的定式化を与え、ここに特殊相対性理論の体系がほぼ完成された。

真空中の光速速度に近い高速度の物体に対して Newton 力学は厳密に成立しないために相対論的力学が適用される。これに対し真空中の光速速度に比較して極めて小さい速度の場合において相対論的力学は従来の Newton 力学に帰着する。すなわち相対論的力学は物体の速度が真空中の光速速度に比較して極めて小さいという極限において Newton 力学を包摂しており、この点で相対論的力学は Newton 力学の一般化とみなせる。実際、天体の運動ならびに日常経験する諸物体の速度は真空中の光速速度に比較して極めて小さいために、Newton 力学は広範囲の力学現象に対して高精度で成立しており、相対論的効果は無視し得る程に小さい。現在、相対論的効果が顕著にみられる現象としては高エネルギーの素粒子ならびに原子核などに関する諸現象が主である。

その後、A. Einstein は加速度座標系の変換則

について研究し、1913年に加速度座標系と一様な重力場との等価性〔等価原理〕に基づいて一般相対性理論を確立した。一般相対性理論の帰結として重力場内での光線の彎曲や時間の遅れなどが示され、いずれも実験的に確認された。

一般相対性理論は曲率をもった四次元時空すなわち曲がった一次元時間と三次元空間の一般座標変換に対して、基本方程式系の数学的形式が不変に保たれるように定式化される。一般相対性理論は重力の伝達機構を四次元時空の幾何学的構造によって説明する点で、近接作用説の立場に立脚している。すなわち四次元時空の曲率が動力場に対応づけられ、四次元時空の各点における曲率（曲がりの度数）はその点の重力の強さを与える。またこの時空の曲率は時空内に存在する物質によって決定される。重力の作用しない空間は曲率が零の四次元時空すなわち平坦な時空を意味し、これは特殊相対性理論における Minkowski 時空にほかならない。したがって一般相対性理論は時空の曲率が零の極限において特殊相対性理論を包摂しており、この点で一般相対性理論は特殊相対性理論の一般化とみなせる。一般相対性理論は主に宇宙の規模の極めて大きな空間的スケールの現象に対して適用される。地上の弱い重力場内において日常経験する空間的スケールの諸現象では、Newton 力学が高精度に成立し、一般相対性理論による効果は極めて小さい。

相対性理論は従来からの時間、空間などの基本概念に対する根本的変革を伴う点で、後世に大きな影響を与えた。従来からの時間と空間は、異なる独立した概念であり、これらは現象を記述するための単なる先見的な思考の形式とされていた。これに対し相対性理論において時間と空間とは独立した概念ではなく時空として一体化され、さらにこの時空は単なる思考の形式ではなく物質と対等の物理的実在として把握される。

相対性理論は基本方程式系の対称性ならびに体

系の論理的整合性という点において、現存するあらゆる物理理論の中で最も優美な理論構造をもっている。

頁数制限により、§ 3 物理教育方法論ならびに § 4 物理教育方法論の必要性などについては、続刊で論述する。